中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

冬季咸水结冰灌溉对河套重盐碱地改良效果研究

郭凯，刘小京，封晓辉，巨兆强，陈环宇，田宇，李劲松，李伟柳，李静

引用本文:
郭凯, 刘小京, 封晓辉, 等. 冬季咸水结冰灌溉对河套重盐碱地改良效果研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 640–648.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200465

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应

Soil improving effect of Suaeda salsa on heavy coastal saline–alkaline land

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1578–1586 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190178

水分调控降低盐分对夏玉米的影响

Moisture control reduces soil salt effect on summer maize

中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1388–1397 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180095

环渤海缺水区盐碱地改良利用技术研究

Reclamation and utilization of saline soils in water–scarce regions of Bohai Sea

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1521–1527 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180725

地膜覆盖对春季咸水灌溉条件下滨海盐渍土水盐动态的影响

Effect of plastic film mulch on soil moisture and salt dynamics under saline water irrigation in coastal saline soils

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1761–1769 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170037

咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望

Advances and expectations of researches on saline soil reclamation by freezing saline water irrigation

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 1016–1024 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160108

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 4 月 第 29 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2021, 29(4): 640−648

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200465

郭凯, 刘小京, 封晓辉, 巨兆强, 陈环宇, 田宇, 李劲松, 李伟柳, 李静. 冬季咸水结冰灌溉对河套重盐碱地改良效果研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 640−648

GUO K, LIU X J, FENG X H, JU Z Q, CHEN H Y, TIAN Y, LI J S, LI W L, LI J. Reclamation effect of freezing saline water irrigation in winter season on the heavy saline-alkali soil in Hetao Irrigation District[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 640−648

冬季咸水结冰灌溉对河套重盐碱地改良效果研究*

郭 凯[1,2], 刘小京[1,2**], 封晓辉[1,2], 巨兆强[1,2], 陈环宇[1,2], 田 宇[1,2], 李劲松[1,2], 李伟柳[1,2], 李 静[1,2]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 采用田间大区试验, 连续 3 年在河套重盐碱区开展了冬季咸水结冰灌溉试验研究, 设置冬季咸水结冰灌溉(FSWI)和无灌溉对照(CK)两个处理, 其中 FSWI 处理的灌水量为 180 mm, 矿化度为 6.79~7.97 g·L^{-1}, 种植作物为青贮玉米, 以分析不同处理下土壤水盐和钠吸附比(SAR)的周年动态以及对作物生长的影响, 探究冬季咸水结冰灌溉对河套重盐碱地的改良效果。结果表明: 与 CK 相比, FSWI 处理显著改变了春季土壤水盐和 SAR 动态。0~20 cm 土层, 春季 FSWI 处理的土壤含水量显著高于 CK 处理, 玉米苗期, FSWI 处理的土壤含水量平均为 24.3%, 显著高于 CK 的 21.6%; FSWI 处理的春季土壤含盐量和 SAR 显著低于 CK 处理, 其中, FSWI 处理的土壤含盐量由灌溉前的 33.86 g·kg^{-1} 降低至玉米苗期的 5 g·kg^{-1} 以下, 而 CK 处理土壤含盐量逐渐升高至玉米苗期的 34.2 g·kg^{-1}; FSWI 处理土壤 SAR 由灌溉前的 21.9 降低至玉米苗期的 9.86, CK 土壤 SAR 则逐渐升高至玉米苗期的 25.00。后续地膜覆盖和夏季降雨使 FSWI 处理的土壤含水量维持在 23.0%以上, 土壤含盐量保持在 5 g·kg^{-1} 以下, 土壤 SAR 保持在 9 左右。20~40 cm 土层与 0~20 cm 土层的土壤水盐和 SAR 变化趋势与表层一致, 但没有表层变化剧烈。此外, 随着灌溉年限的延长, 同时期土壤含盐量和 SAR 呈逐年降低的趋势。FSWI 处理玉米出苗率在 70%以上, 干物质产量为 9~12 t·hm^{-2}, 而 CK 处理由于土壤含水量较低(<21.0%), 并且土壤含盐量和 SAR 均较高, 造成玉米出苗率极低, 进而导致绝收。因此冬季咸水结冰灌溉改变了土壤水盐动态过程, 变春季积盐为脱盐, 显著降低了土壤 SAR, 并补充了土壤水分, 保证了饲用玉米的正常种植和生长, 这为该地区盐碱地改良和饲料作物种植提供了技术支持。

关键词: 河套重盐碱地; 咸水结冰灌溉; 水盐动态; 淋洗脱盐; 作物生长

中图分类号: S156.4+2 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Reclamation effect of freezing saline water irrigation in winter season on the heavy saline-alkali soil in Hetao Irrigation District*

GUO Kai[1,2], LIU Xiaojing[1,2**], FENG Xiaohui[1,2], JU Zhaoqiang[1,2], CHEN Huanyu[1,2], TIAN Yu[1,2], LI Jinsong[1,2], LI Weiliu[1,2], LI Jing[1,2]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* 国家重点研发计划项目(2016YFC0501308)和国家自然科学基金项目(51809260)资助

** 通信作者: 刘小京, 主要从事盐碱地资源高效利用研究。E-mail: xjliu@sjziam.ac.cn
郭凯, 主要从事盐碱区水土资源高效利用研究。E-mail: guokai@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2020-06-18 接受日期: 2020-10-13

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0501308) and the National Natural Science Foundation of China (51809260).

** Corresponding author, E-mail: xjliu@sjziam.ac.cn

Received Jun. 18, 2020; accepted Oct. 13, 2020

Abstract: A three-year experiment of freezing saline water irrigation in winter season was conducted in a heavy saline-alkali area in Hetao Irrigation District. Two treatments, freezing saline water irrigation (FSWI) and no irrigation (CK), were implemented; the saline water irrigation amount was 180 mm with a salinity of 6.79–7.97 g·L^{-1} in the FSWI treatment, and the planting crops were silage maize. This study aimed to analyze the effects of freezing saline water irrigation on the seasonal dynamics of soil water and salt and maize growth and to evaluate the reclamation effect of freezing saline water irrigation on the saline-alkali soil in Hetao Irrigation District. The results showed that, compared with CK, the FSWI treatment significantly changed the soil water, salt, and sodium adsorption ratio (SAR) dynamics in the spring. In the 0–20 cm soil layer of the FSWI treatment, till the seedling stage of maize, the mean soil water content (24.3%) were significantly higher than that under CK treatment (21.6%) in spring. The soil salt content and SAR level under FSWI treatment were significantly lower than those under CK treatment. Under FSWI treatment, the soil salt content was decreased from 33.86 g·kg^{-1} before irrigation to <5 g·kg^{-1} during the seedling stage of maize, while under CK treatment, the soil salt content was kept at 34.2 g·kg^{-1}. The soil SAR level under FSWI treatment was decreased from 21.9 before irrigation to 9.86 during the seedling stage of maize, while it was 25 during the seedling stage under CK treatment. Plastic film mulching and subsequent rainfall in the summer maintained the higher soil water content (>23.0%) and lower soil salinity (<5 g·kg^{-1}) and lower SAR level (<9) in the FSWI treatment. The trends for soil water, salt, and SAR in the 20–40 cm layer were similar to but not greater than those in the 0–20 cm layer. Under FSWI treatment, the emergence rate of maize was >70%, and the biomass of maize was 9–12 t·hm^{-2}. Moreover, the soil salt content and SAR level in the same season decreased with increasing years of saline water irrigation. The lower soil water content, higher soil salt content, and SAR under CK treatment led to a lower emergence rate and maize biomass. Therefore, freezing saline water irrigation in winter season significantly changed the natural dynamics of soil water and salt; soil salinization decreased as salt leaching combined with a significant decrease in soil SAR and an increase in the soil water content by infiltration of meltwater which ensured normal planting and maize growth. This technology may support the reclamation of saline-alkali soil and forage grass plantation in the area.

Keywords: Heavy saline-alkali soil in Hetao Irrigation District; Freezing saline water irrigation; Soil water and salt dynamics; Salt leaching; Crop growth

内蒙古河套灌区是我国最大的自流灌区，同时也是我国重要的粮食主产区之一[1]。灌区总面积为1679.31 km^2，灌溉面积 876 km^2[2]，其中 80%灌溉依赖于黄河引水[3]。由于灌溉不当，且灌排工程不配套，造成排水不畅，导致灌区地下水位抬升，并超过了临界水位[4]。同时受降雨稀少、蒸发强烈等气候条件影响，灌区土壤普遍面临着盐渍化问题。据统计，灌区一半以上灌溉面积的土地受到了不同程度盐渍化的影响，制约了该地区农业生产[5-6]。此外，随着经济不断发展，农业灌溉引水量逐年减少，淡水资源不足问题日益凸显，在淡水资源约束下，寻找可替代的水资源是目前该地区盐碱地利用和农业生产的重要途径[7-8]。而灌区丰富的地下咸水资源既是土壤盐碱化的主要诱因之一，也是亟待开发利用的水资源。如何合理开发和利用地下水资源，对河套灌区盐碱地农业生产和生态环境建设具有重要意义。

咸水灌溉一直是盐碱地利用和农业生产的重要研究内容之一[9]。大量研究表明，干旱条件下，咸水灌溉能够显著稀释土壤溶液浓度，提高土壤含水量，减少因干旱而导致作物减产，大幅提高作物产量[10-11]。且咸水灌溉过程中，咸水中的离子与土壤的离子交换吸附作用可显著增强土壤颗粒凝聚，促进土壤大孔隙的形成，有利于水分入渗和盐分的淋洗[12-13]。此外，咸水灌溉能够调控地下水位、扩大地下库容、促进降雨入渗和地下咸水淡化[4,14]。而作物对盐分胁迫的适应性具有阶段性特征，其中作物在苗期对盐分的耐受性最为敏感，而这一时期又是作物需水的关键期[15]，因此，灌溉咸水的矿化度不宜过高，否则会导致土壤剖面的盐分累积，造成作物减产。据研究，利用小于 3 g·L^{-1} 的咸水进行灌溉时，可以保证作物稳产，且能够保持土壤盐分的平衡，而当高于此值时，作物产量则随着灌溉咸水矿化度的升高而大幅降低[16-17]。而在河套重盐碱区地下水矿化度普遍偏高而不能直接利用，如何改变高矿化度咸水利用方式，创建适宜作物生长的低盐根层土壤环境，是该地区亟待解决的问题。

对于高矿化度咸水的利用，近年来，我们在环渤海重盐碱地区开展了冬季咸水结冰灌溉改良盐碱地技术的研究[18-19]，该技术充分利用区域气候特点，依据咸水结冰冻融咸淡水分离的原理，在冬季利用当地高矿化度咸水灌溉盐碱地，并迅速在地表形成咸水冰层，春季咸水冰融化时高矿化度咸水先融化入渗，之后融化的低矿化度咸水和淡水再入渗，使土壤表层脱盐[20]。室内和田间试验结果均表

明，利用 15 g·L^{-1} 的咸水进行结冰灌溉时，对土壤表层盐分的淋洗效果显著，结合春季抑盐措施和后续降雨，能够保证作物整个生育期的正常生长，且能够获得稳定的产量[21-23]。在河套灌区，同样有丰富的地下咸水资源和自然的冷资源[24]，但降雨量低于环渤海地区，冬季利用咸水结冰灌溉的方式能否在该区取得预期的盐分淋洗效果仍需进一步探讨。此外，近年来随着该地区农业种植结构的调整，饲料作物种植面积不断扩大，开展基于冬季咸水结冰灌溉下饲料作物耐盐种植对该地区农业生产也具有重要意义。

因此本研究针对上述问题，结合耐盐饲料作物种植，在内蒙古河套灌区开展冬季咸水结冰灌溉下的土壤水盐动态过程和改良效果研究，以建立重盐碱地饲料作物耐盐种植技术模式，为冬季咸水结冰灌溉技术的本土化利用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在内蒙古乌拉特前旗东广益站的河套灌区盐碱地改良试验区(108°82′E, 41°03′N)，试验区地处干旱、半干旱地带，属典型的大陆性气候特征，冬季严寒少雪，夏季高温干热，降水稀少，蒸发强烈。年平均降雨量为 130~210 mm，多集中在 7—9 月份。年平均蒸发量 2068 mm，约为年降雨量的 10 倍[25]。年平均气温 7.2 ℃，1 月平均气温–11.8 ℃。试验地紧邻乌梁素海，地下水位浅，为 0.4~1.8 m，地下水矿化度 7.9 g·L^{-1}。土壤质地为黏质土壤，表层土壤容重为 1.45 g·cm^{-3}；土壤含盐量极高，表层土壤盐分高于 25 g·kg^{-1}。除部分盐生植物如盐角草(*Salicornia europaea*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇(*Phragmites communis*)外，大部分植物均不能生长。此外，该地区土壤为以硫酸钠为主的硫酸盐土，硫酸根离子和钠离子占总盐分的 60%以上(表 1)。

表 1 试验区土壤化学特性

Table 1 Soil chemical properties in the experimental area

土壤深度 Soil depth (cm)	HCO_3^- (g·kg^{-1})	Cl^- (g·kg^{-1})	SO_4^{2-} (g·kg^{-1})	Ca^{2+} (g·kg^{-1})	Mg^{2+} (g·kg^{-1})	K^++Na^+ (g·kg^{-1})	pH	SAR (mmol·L^{-1})$^{0.5}$	含盐量 Salt content (g·kg^{-1})
0~20	0.33	8.33	9.83	2.09	2.30	6.41	7.74	22.91	29.30
20~40	0.38	3.33	4.36	0.60	1.44	2.40	7.96	12.07	12.52
40~60	0.31	2.97	2.51	0.53	0.47	2.39	8.13	18.14	9.18
60~80	0.38	1.89	1.71	0.37	0.34	1.58	8.33	14.28	6.25
80~100	0.38	1.33	1.95	0.37	0.45	1.21	8.43	9.95	5.68

1.2 试验设计和田间管理

2017—2019 年连续 3 年在试验区进行了田间大区试验。试验田块长 50 m、宽 40 m，田块间设置宽 1 m、高 0.5 m 的田垄，以防止灌水侧渗。试验设置咸水冬季结冰灌溉(FSWI)和不灌溉(对照，CK)2 个处理。在每年秋季土地冻结前，对以上两个处理的试验田块均进行翻耕、旋耕和土地平整。对于 FSWI 处理，每年 1 月初开始对进行灌溉，其中 2017 年、2018 年和 2019 年灌溉咸水的矿化度分别为 6.79 g·L^{-1}、7.39 g·L^{-1} 和 7.97 g·L^{-1}，且灌溉咸水中的主要阴阳离子分别为 SO_4^{2-} 和 Na^+，占总盐分的 70%以上，灌溉水量均为 180 mm，灌溉时气温 –10.2~–11.2 ℃。为保证灌溉后咸水稳定结冰，采用 3 次灌溉的方式进行，即第 1 次灌少量水(约为总水量的 30%)，待灌溉水在地表结冰后，进行后两次灌水，直至达到灌溉水量要求。冬季咸水结冰灌溉后，咸水在地表迅速冻结成冰，春季随着气温回升，咸水冰逐渐融化并入渗，至 4 月中下旬，咸水冰完全融化入渗，并能够达到耕作要求时，对地表进行地膜覆盖以防止土壤返盐。5 月中旬，平均气温回升至 20 ℃以上时，进行青贮玉米(*Zea mays*)播种，品种为‘青贮金玉’。玉米的播种方式为膜上打孔播种，播种密度为 60 000 株·hm^{-2}；按照当地施肥量，每年播种期一次性施入纯氮 132 kg·hm^{-2} 和纯磷 48 kg·hm^{-2}，施肥方式为穴施，玉米整个生长期不再灌水。对于 CK 处理，除冬季未进行结冰灌溉外，每年秋季土地整理、春季地膜覆盖、玉米播种和田间管理等均与 FSWI 处理一致。

1.3 数据获取

为研究不同处理下土壤水分、盐分、钠吸附比(SAR)变化动态以及对作物生长的影响，2017—2019 年，分别于灌水前(2016-12-20、2017-12-12、2018-12-15)、融水入渗后(2017-03-20、2018-04-25、2019-04-22)及玉米苗期(2017-06-01、2018-05-31、

2019-06-04)、生长期(2017-08-10、2018-08-03、2019-08-08)和收获期(2017-10-10、2018-10-14、2019-10-09), 对每个处理大区土壤进行取样, 每 20 cm 一层, 取土深度为 40 cm, 每个处理 5 个重复。每个大区划分为 5 个重复调查小区, 面积为 4 m×4 m, 在每个调查小区, 在作物苗期调查玉米的出苗率和穴有苗率, 玉米灌浆期调查株高, 收获期调查玉米生物量。

采用烘干法测定土壤含水量; 土壤风干后, 按 1∶5 土水比浸提土壤溶液, 测定土壤离子。采用双指示剂滴定法测定 HCO_3^- 含量, $AgNO_3$ 滴定法测定 Cl^- 含量, EDTA 间接络合滴定法测定 SO_4^{2-}、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量, 利用阴阳离子平衡法求得 K^+ 和 Na^+ 合量, 土壤含盐量为各阴阳离子之和。利用原子吸收分光光度计法测定土壤 Na^+ 含量。土壤钠吸附比(SAR)由式(1)计算所得。此外, 玉米生物量通过收获调查小区鲜重, 之后取部分样品后, 在室内烘干测定含水量, 并换算成干物质生物量。

$$\mathrm{SAR}=\frac{\left[\mathrm{Na}^{+}\right]}{\sqrt{\left[\mathrm{Ca}^{2+}\right]+\left[\mathrm{Mg}^{2+}\right]}} \tag{1}$$

式中: 各离子单位为 $mmol\cdot L^{-1}$[26]。

1.4　统计分析

本文所有数据均采用 Excel 2016 对土壤水盐数据进行汇总和整理, 采用 SPSS 19.0 对各处理间相同土层的土壤含水量、含盐量和 SAR 进行独立样本 *T* 检验, 采用 Excel 2016 绘制土壤水盐和 SAR 的土壤剖面分布图。

2　结果与分析

2.1　咸水结冰灌溉下土壤水分的变化

图 1 为不同时期两个处理土壤质量含水量的变化。灌水前(2016-12-20、2017-12-12、2018-12-15), 土壤处于初始冻结阶段, 秋季的强烈蒸发致使表层(0~20 cm)土壤含水量较低, 平均为 19.4%~24.8%。春季融冰后(2017-03-20、2018-04-25、2019-04-22), FSWI 处理中, 由于融水的入渗, 0~20 cm 土壤含水量平均为 22.2%~26.7%, 并且显著大于 CK 处理, 而 CK 处理由于春季强烈蒸发, 表层(0~20 cm)土壤含水量均小于 21.4%; 20~40 cm 土层, 2017 春季融冰后(2017-03-20), FSWI 处理的土壤含水量与 CK 没有显著差异, 2018 年和 2019 年春季融冰后(2018-04-25 和 2019-04-22), FSWI 处理的土壤含水量显著高于 CK 处理。玉米苗期(2017-06-01、2018-05-31、2019-06-04), 由于在两个处理中进行了地膜覆盖, FSWI 处理

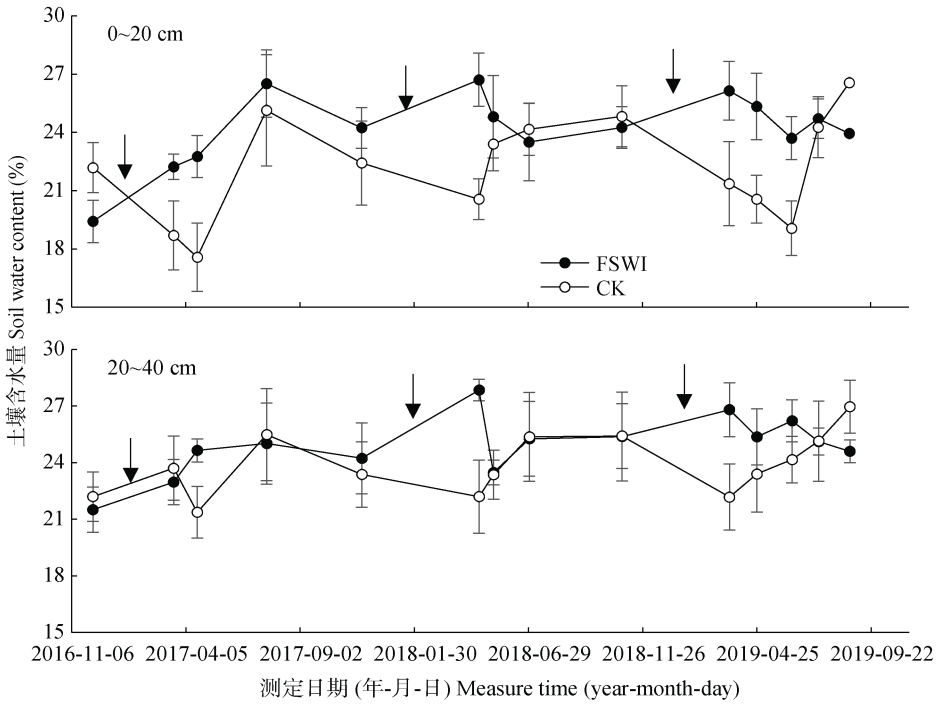

图 1　咸水结冰灌溉处理下 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤水分季节动态

Fig. 1　Seasonal dynamics of soil water in 0–20 cm and 20–40 cm layers under treatment of freezing saline water irrigation

FSWI 和 CK 处理分别为冬季咸水结冰灌溉处理和不灌溉处理。图中箭头示咸水灌溉时间。FSWI and CK are the freezing saline water irrigation and non-irrigation (control) treatments, respectively. The arrows in the figure show the irrigation time.

0~20 cm 土层土壤含水量均大于 24.0%, CK 处理中 0~20 cm 土壤含水量略有升高但均低于 22.0%, 并且 FSWI 处理在该土层的土壤含水量显著高于 CK 处理。玉米生长期(2017-08-10、2018-08-03、2019-08-08)和玉米收获期(2017-10-10、2018-10-14、2019-10-09), 不同处理各土层的含水量随降雨和土壤蒸发变化均呈现相同的变化趋势, 在玉米生长期表层土壤含水量显著升高, 在玉米收获期则显著减低, 相同土层的土壤含水量在处理之间没有显著差异。

因此, 冬季咸水结冰灌溉显著改变了土壤水分季节动态过程, 春季融水的入渗显著提高了土壤表层含水量, 结合地膜覆盖, 较高的土壤含水量水平得以保持, 为春季玉米播种和出苗创造了良好的土壤水分条件, 同时结合后续的夏季降雨, 保证了玉米整个生育期的生长。

2.2 咸水结冰灌溉下土壤盐分的变化

图 2 为不同处理土壤盐分季节动态变化, 由于试验区地下水位浅、蒸发强烈、降雨稀少, 试验区土壤盐分处于较高水平。冬季咸水结冰灌溉显著影响了土壤盐分的季节动态, 2017 年灌水前(2016-12-20), FSWI 处理的表层土壤(0~20 cm)含盐量高达 33.86 $g\cdot kg^{-1}$, 春季咸水冰完全融化入渗后(2017-03-20), 土壤盐分迅速降低至 4.85 $g\cdot kg^{-1}$, 显著低于对照处理, 土壤盐分淋洗率达 85.6%; 至玉米苗期(2017-05-14), 土壤盐分保持在 5 $g\cdot kg^{-1}$ 左右; 随着夏季降雨的来临, 雨水的淋洗使得土壤盐分在玉米整个生育期保持在较低的水平; 秋季随着降雨的减少, 加之蒸发量大, 土壤盐分又呈上升趋势。而 CK 处理中, 表层(0~20 cm)土壤随试验区降雨和蒸发的变化而呈春、秋、冬 3 季积盐, 夏季淋盐的变化趋势, 虽然春季对土壤进行了地膜覆盖, 但对于土壤盐分的抑制作用不明显, 土壤盐分仍然处于较高的水平, 土壤含盐量均高于 11 $g\cdot kg^{-1}$。相同时期, 20~40 cm 土层土壤含盐量低于 0~20 cm 土层, 并且各处理间的土壤盐分动态与表层(0~20 cm)一致, 但没有表层明显。此外, 2018 年和 2019 年, 各处理不同土层土壤盐分的季节变化趋势与 2017 年基本一致, CK 处理中, 相同时期土壤盐分没有显著差异, FSWI 处理中, 随着灌溉年限的延长, 相同时期土壤盐分呈逐年降低的趋势。

因此在内蒙河套重盐碱地进行冬季咸水结冰灌溉, 使得土壤变春季积盐为脱盐, 土壤盐分保持在较低的水平, 为玉米的种植和生长提供了低盐土壤条件。以上结果与在滨海地区重盐碱地的盐分淋洗效果基本一致, 因此冬季咸水结冰灌溉技术在内蒙河套重盐碱区具有较好的适应性。

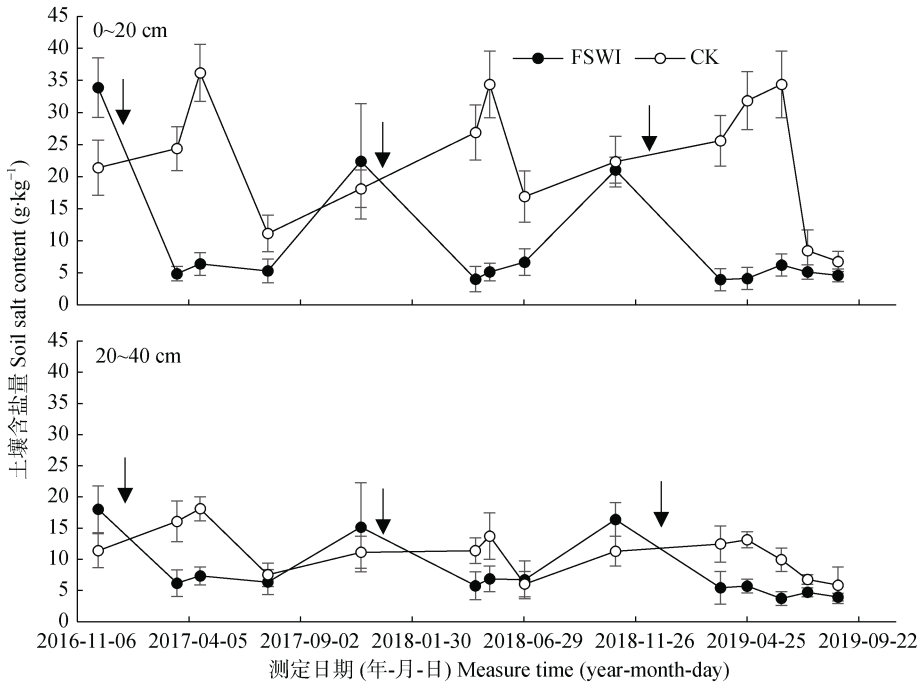

图 2 咸水结冰灌溉处理下 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤盐分季节动态

Fig. 2 Seasonal dynamics of soil salt in 0–20 cm and 20–40 cm layers under treatment of freezing saline water irrigation

FSWI 和 CK 处理分别为冬季咸水结冰灌溉处理和不灌溉处理。图中箭头示咸水灌溉时间。FSWI and CK are the freezing saline water irrigation and non-irrigation (control) treatments, respectively. The arrows in the figure show the irrigation time.

2.3　咸水结冰灌溉下土壤 SAR 的变化

土壤 SAR 是土壤中 Na^+和 Ca^{2+}、Mg^{2+}的相对比值, 也是土壤碱化度的简化指标, 土壤 SAR 水平越大, 土壤碱化度也就越高[26]。同时土壤阳离子中 Na^+对植物生长影响最大, 土壤 SAR 的大小也能反映出对植物生长的伤害程度[27]。因此本文对不同处理不同土层土壤 SAR 的季节动态进行了分析, 结果如图 3 所示。试验区土壤是以 Na_2SO_4为主的硫酸盐土, 而同时土壤中的 Ca^{2+}和 Mg^{2+}含量也处于较高的水平(表 1), 因此相对于滨海重盐碱区, 本研究所在试验区的土壤 SAR 值较低。2017 年灌水前(2016-12-20), FSWI 处理的表层土壤(0~20 cm) SAR 为 21.9, 春季咸水冰完全融化入渗后(2017-03-20), 土壤 SAR 迅速降低至 9.84, 显著低于对照处理; 春季和夏季, 土壤 SAR 保持在 9 以下, 秋季土壤 SAR 又呈上升趋势。对照处理中, 表层(0~20 cm)土壤 SAR 呈春、秋、冬 3 季上升, 夏季略有下降的变化趋势, 并且土壤 SAR 均在 10 以上。各处理的 20~40 cm 土层土壤 SAR 的变化与表层(0~20 cm)一致, 且没有表层明显。此外, 2018 年和 2019 年, 各处理不同土层的土壤 SAR 的变化趋势与 2017 年基本一致, FSWI 处理中, 随着灌溉年限的延长, 相同时期表层(0~20 cm)土壤 SAR 呈逐年降低的趋势, 而在 20~40 cm 土层则没有明显的逐年降低的趋势。

以上结果表明, 土壤中的 Na^+在土壤中的迁移速度要快于 Ca^{2+}和 Mg^{2+}, 冬季咸水结冰灌溉下, 融水的入渗可迅速降低土壤的 SAR, 降低了土壤的碱化程度, 同时可减少土壤盐分对植物生长的伤害。

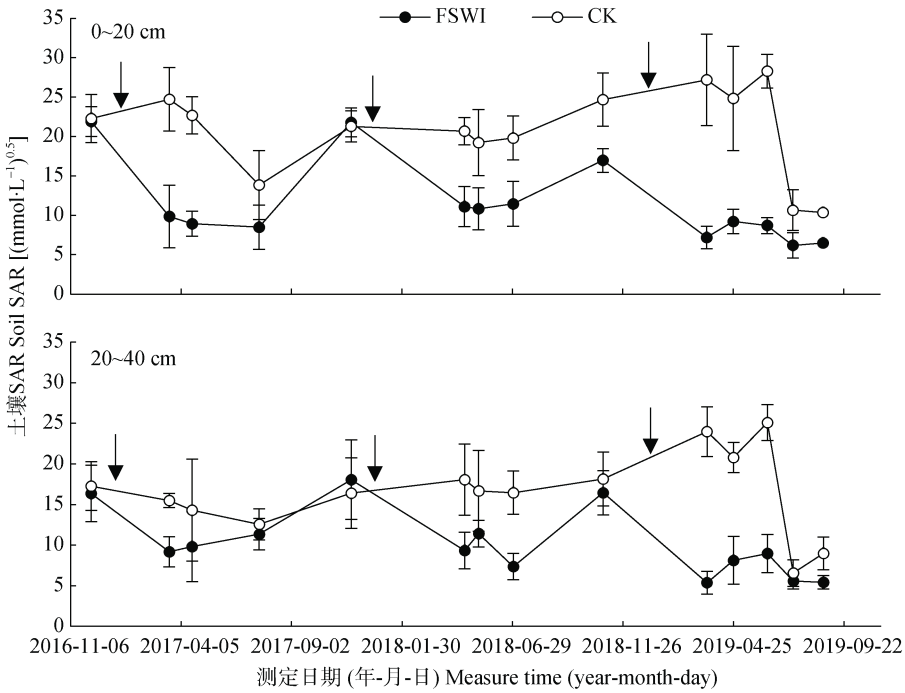

图 3　咸水结冰灌溉处理下 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤钠吸附比(SAR)季节动态

Fig. 3　Seasonal dynamics of soil sodium adsorption ratio (SAR) in 0–20 cm and 20–40 cm layers under treatment of freezing saline water irrigation

FSWI 和 CK 处理分别为冬季咸水结冰灌溉处理和不灌溉处理。图中箭头示咸水灌溉时间。FSWI and CK are the freezing saline water irrigation and non-irrigation (control) treatments, respectively. The arrows in the figure show the irrigation time.

2.4　咸水结冰灌溉下作物生长的变化

冬季咸水结冰灌溉下, 咸水冰融水入渗后, 进行了地膜覆盖, 以防止返盐, 于 5 月中下旬进行玉米膜上打孔播种, 在玉米苗期和收获期进行了玉米生长指标调查。FSWI 处理中, 春季玉米播种期土壤含水量在 24%以上(图 1), 土壤含盐量降低至 5 $g\cdot kg^{-1}$ 以下(图 2), 并且伴随着耕层土壤 SAR 的显著降低(图 3), 后续地膜覆盖和降雨保持了较好的土壤水盐条件, 进而保证了玉米的正常生长。如表 2 所示, 冬季咸水结冰灌溉下, 玉米出苗率均高于 70.0%, 穴有苗率均高于 85.0%, 株高均高于 1.25 m, 保证了正常的玉米生物量(大于 9 $t\cdot hm^{-2}$), 以上指标均显著高于对照。而对照由于玉米播种期较低的土壤水分, 较高的土壤含盐量和较高的 SAR 水平, 玉米的正常生长受到抑制, 出苗率和穴有苗率极低, 其中出苗率≤6.5%, 穴有苗率≤9.2%, 株高≤1.04 m, 导致玉米的生物量较低(≤0.67 $t\cdot hm^{-2}$)。因此, 冬季咸水结冰灌溉通过调控春季土壤水盐动态过程, 保证春播作物的正常生长。

表 2 咸水结冰灌溉处理下玉米出苗率、穴有苗率、株高和产量的变化

Table 2 Emergence rates, plant establishment rates, plant heights and biomasses under treatment of freezing saline water irrigation

年份 Year	处理 Treatment	出苗率 Germination rate (%)	穴有苗率 Plant establishment rate (%)	株高 Plant height (m)	生物量 Biomass ($t·hm^{-2}$)
2017	FSWI	72.7±7.6a	90.0±7.6a	1.25±0.11a	9.20±0.61a
	CK	4.3±1.6b	6.5±0.6b	1.01±0.21b	0.75±0.06b
2018	FSWI	76.6±2.9a	94.4±9.8a	1.34±0.16a	10.6±0.74a
	CK	6.5±0.6b	9.2±0.7b	0.93±0.16b	0.67±0.04b
2019	FSWI	71.1±5.8a	88.8±8.2a	1.46±0.14a	12.30±0.87a
	CK	5.2±0.6b	8.3±1.2b	1.04±0.13b	0.73±0.07b

FSWI 和 CK 处理分别为冬季咸水结冰灌溉处理和不灌溉处理。不同小写字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。FSWI and CK are the freezing saline water irrigation and non-irrigation (control) treatments, respectively. Different lowercase letters mean significant different between two treatments at $P<0.05$ level.

3 讨论与结论

河套灌区由于长期采用黄河引水灌溉，造成该地区地下水长期处于高位，且地下咸水矿化度较高而不能直接利用，导致土壤盐碱化问题极为严重[1,5-7]。因此该地区地下咸水的利用对调控地下水位和减少土壤返盐具有重要作用[2-3]。已有研究表明，采用咸水结冰冻融咸淡水分离入渗原理，可实现利用高矿化度地下咸水改良盐碱地的目标[22]。据研究，咸水冰融化过程中的脱盐效果显著，利用 15 $g·L^{-1}$ 的咸水冰融化能够产生 60%以上的矿化度小于 3 $g·L^{-1}$ 的微咸水和淡水[20-21]，这部分水的入渗可较好地淋洗土壤表层盐分。前期在滨海重盐碱区开展的田间和室内试验结果均显示：利用水量为 180 mm、矿化度为 15 $g·L^{-1}$ 的咸水进行灌溉时，可使 0~30 cm 土层土壤盐分由最初的 9.8 $g·kg^{-1}$ 降至 3 $g·kg^{-1}$ 以下，结合春季土壤抑盐措施和后续降雨，保证了耐盐作物如棉花(*Gossypium herbaceum*)、油葵(*Helianthus annuus*)等的正常生长[22-23]。本研究在河套重盐碱区开展的冬季咸水结冰灌溉下土壤水盐动态研究，取得了与上述一致的研究结果，通过咸水结冰灌溉后，融水的入渗可迅速降低土壤盐分，并补充土壤水分，实现了玉米的正常出苗和生长。此外，有研究表明：土壤中的离子迁移速度由大到小依次为 Na>K>Ca>Mg[28]，本研究中土壤 SAR 的变化反映以上离子的变化过程(图 3)。并且土壤盐分的迁移过程与土壤 SAR 的变化具有相似性，本研究不同处理中，随着土壤盐分的累积和淋洗，土壤 SAR 呈现上升和下降的变化趋势(图 2 和图 3)。

玉米具有生物量大、青贮品质优良的特性，是河套灌区普遍种植的作物，但是由于其盐敏感的特性[5]，在盐碱地种植存在很大问题，灌区内普遍利用黄河春汛条件，采用过量的黄河水对土壤进行大水漫灌压盐的方式进行玉米种植，这也是导致地下水迅速抬升和土壤次生盐渍化的重要原因之一[1-3]，并且造成了淡水资源浪费严重。本研究中采用当地的地下咸水对盐碱地进行结冰灌溉，在不引用黄河水的条件下，能够合理调控耕层土壤盐分，实现了玉米的正常种植。另外，通过抽提地下水，可进一步降低地下水位，缓解因地下潜水蒸发而导致的土壤返盐[28]。同时，土壤的离子组成显著影响作物的正常生长，其中，Na^+对作物的单离子毒害作用最大[29]，在滨海盐碱区，土壤为以 NaCl 为主的滨海盐土，土壤的 SAR 水平极高(>30)，即使土壤含盐量低于 3 $g·kg^{-1}$，玉米的正常生长依然受到抑制。而在本研究中，土壤是以 Na_2SO_4 为主的硫酸盐土，且 Ca^{2+}和 Mg^{2+}含量比例较高，土壤 SAR 水平较低(<20)，缓解了 Na^+对玉米出苗和生长的单离子毒害，同时，咸水结冰灌溉下，融水的入渗使土壤 SAR 水平进一步降低，当土壤含盐量降至 5 $g·kg^{-1}$ 时，能够保证玉米的正常出苗和生长。有研究表明，在非盐碱土壤条件下，玉米的株高可达 1.5~2 m，干物质产量可达 12~16 $t·hm^{-2}$[5,30]，但由于试验区土壤含盐量依然较高，玉米生长受到不同程度的抑制，造成玉米株高在 1~1.25 m，干物质产量在 9~12 $t·hm^{-2}$，但在重盐碱区玉米干物质产量依然较为理想。在盐胁迫条件下，作物生长过程中能够促进较多的渗透调节物质的合成，对提高作物品质具有重要作用，在盐碱条件下青贮玉米的品质如粗蛋白、洗涤系数、饲喂价值等指标仍需进一步研究。

本文通过连续 3 年对冬季咸水结冰灌溉下河套重盐碱地的土壤水盐运移特征进行分析，得出如下结论：

1)冬季咸水结冰灌溉显著影响了土壤水盐季节

动态过程，提高了春季土壤含水量，在玉米苗期，土壤含水量高于 24%，土壤含盐量降低至 5 $g \cdot kg^{-1}$ 以下，保证了玉米的正常出苗和群体建成。随着灌溉年限的延长，相同时期土壤含盐量呈逐年降低的趋势。

2)土壤 SAR 呈现与土壤含盐量相同的变化趋势，咸水结冰灌溉显著降低了春季土壤 SAR 水平，玉米苗期土壤SAR为8~10，后续夏季降雨土壤的低SAR得以保持。

3)咸水结冰灌溉下玉米的出苗率在 70%以上，干物质产量在 9~12 $t \cdot hm^{-2}$，并随着灌溉年限的延长，玉米的干物质产量呈逐年升高的趋势。

综上所示，内蒙古河套重盐碱区利用冬季咸水结冰灌溉可显著降低土壤含盐量和 SAR 水平，并补充土壤水分，能够满足饲用玉米的正常种植和生长，这为该地区盐碱地的改良和饲料作物抗盐种植提供了技术支持。

参考文献 References

[1] 李亮，史海滨，贾锦凤，等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31–35
LI L, SHI H B, JIA J F, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Enginerring, 2010, 26(1): 31–35

[2] 王卫光，王修贵，沈荣开，等. 河套灌区咸水灌溉试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 92–96
WANG W G, WANG X G, SHEN R K, et al. Experimental research on saline-water irrigation in Hetao Irrigation District [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Enginerring, 2004, 20(5): 92–96

[3] REN D Y, XU X, HAO Y Y, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River Basin: Application to maize, sunflower and watermelon[J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 122–139

[4] 杨树青，叶志刚，史海滨，等. 内蒙河套灌区咸淡水综合利用灌溉模式的研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 8–17
YANG S Q, YE Z G, SHI H B, et al. Simulation and prediction of rotational irrigation with salty and fresh water in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Enginerring, 2010, 26(8): 8–17

[5] 李慧琴，王胜利，郭美霞，等. 不同秸秆隔层材料对内蒙灌区土壤水盐运移及玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 91–94
LI H Q, WANG S L, GUO M X, et al. effect of different straw interlayer on soil water-salt movement and maize yield in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4): 91–94

[6] 王婧，逄焕成，任天志，等. 地膜覆盖与秸秆深埋对河套灌区盐渍土水盐运动的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 52–59
WANG J, PANG H C, REN T Z, et al. Effect of plastic film mulching and straw buried on soil water-salt dynamic in Hetao Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Enginerring, 2012, 28(15): 52–59

[7] 马文军，程琴娟，李良涛，等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73–80
MA W J, CHENG Q J, LI L T, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Enginerring, 2010, 26 (1): 73–80

[8] TALEBNEJAD R, SEPASKHAH A R. Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa[J]. AgriculturalWater Management, 2015, 159: 225–238

[9] 王全九，单渔洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117–126
WANG Q J, SHAN Y Y, Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Mechinery, 2015, 46(12): 117–126

[10] 刘宗潇，朱成立，翟亚明，等. 微咸水灌溉对土壤 EC 值及冬小麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 59–64
LIU Z X, ZHU C L, ZHAI Y M, et al. Influence of brackish-water irrigation on soil EC and yield of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 59–64

[11] 龚雨田，孙书洪，闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. 节水灌溉, 2017, (9): 33–42
GONG Y T, SUN S H, YAN H W. Study on the impact of saline water with differnent meterialization degree on growth characteristics and yield of winter wheat[J]. Water Saving Irrigiaiton, 2017, (9): 33–42

[12] 吴忠东，王全九. 不同初始含水率条件下的微咸水入渗试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 53–58
WU Z D, WANG Q J. Saline water infiltration with different initial moisture contents[J]. Transactions of the CSAM, 2010, 41(sup): 53–58

[13] 吴忠东，王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64–75
WU Z D, WANG Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the CSAM, 2010, 41(7): 64–75

[14] 李取生，王志春，李秀军. 苏打盐渍土壤微咸水淋洗改良技术研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 342–348
LI Q S, WANG Z C, LI X J. Sodium bicarbonate saline soil improvement using gentle salty water leacing techniques[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3): 342–348

[15] QADIR M, OSTER J D. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture[J]. Science of the Total Environment, 2004, 323: 1–19

[16] 肖振华，万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 359–366

XIAO Z H, WAN H F. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properites[J]. Acta Pedologica Sinca, 1998, 35(3): 359–366

[17] WANG X P, YANG J S, LIU G M. et al. Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution[J]. Agricultural Water Management, 2015,149: 44–54

[18] 郭凯, 张秀梅, 李向军, 等. 冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 431–435
GUO K, ZHANG X M, LI X J, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on the reclamation of coastal saline soil[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 431–435

[19] LI Z G, LIU X J, ZHANG X M, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 498–502

[20] 郭凯, 刘小京. 咸水结冰融化过程中水质与水量的变化规律初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 56–60
GUO K, LIU X J. The primary research on the variation of melted water quality and quantity during saline ice melting[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1): 56–60

[21] GUO K, LIU X J. Dynamics of meltwater quality and quantity during saline ice melting and its effects on the infiltration and desalinization of coastal saline soils[J]. Agricultural Water Management, 2014, 139: 1–6

[22] GUO K, LIU X J. Infiltration of meltwater from frozen saline water located on the soil can result in reclamation of a coastal saline soil[J]. Irrigation Science, 2015, 33(6): 441–452

[23] 郭凯, 陈丽娜, 张秀梅, 等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水入渗后滨海盐土的水盐分布[J]. 中国生态农业学报, 2011,19(3): 506–510
GUO K, CHEN L N, ZHANG X M, et al. Water and salt distribution in coastal saline soil after infiltration of meltwater of saline water ice with different sodium adsorption ratio[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 506–510

[24] LI R P, SHI H B, FLERCHINGER G N, et al. Simulation of freezing and thawing soils in Inner Mongolia Hetao Irrigation District, China[J] Geoderma, 2012, 173/174: 28–33

[25] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155: 363–370

[26] SUAREZ D L, WOOD J D, SCOTT M, et al. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86: 150–164

[27] 杨帆, 王志春, 肖烨. 冬季结冰灌溉对苏打盐碱土水盐变化的影响[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1241–1246
YANG F, WANG Z C, XIAO Y. Effect of freezing water irrigation on the changes of soilwater and salt in saline-sodic soil area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(10): 1241–1246

[28] SMITH C J, OSTER J D, SPOSITO G. Potassium and magnesium in irrigation water quality assessment[J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 59–64

[29] 解卫海, 马淑杰, 祁琳, 等. Na^+吸收对干旱导致的棉花叶片光合系统损伤的缓解作用[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6549–6556
XIE W H, MA S J, QI L, et al. mitigating effect of Na^+ accumulation on the drought-induced damage to photosynthetic apparatus in cotton seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6549–6556

[30] 郭娅, 尹焕丽, 常凤, 等. 株间穴施对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 农学学报, 2020,10(3): 43–48
GUO Y, YIN H L, CHANG F, et al. Inter-plant hole application of fertilizer: Effect on yield and nutrient absorption of summer maize[J]. Journal of Agriculture, 2020, 10(3): 43–48